

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
13. Juni 2002 (13.06.2002)

PCT

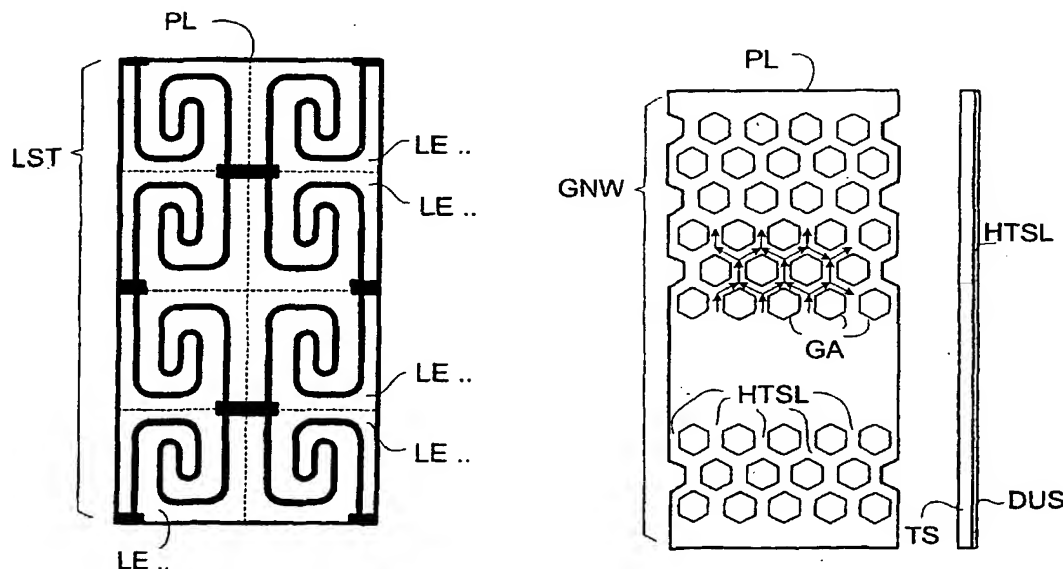
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/47180 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01L 39/16** (71) *Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT* [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE01/04595 (72) *Erfinder; und*
- (22) Internationales Anmeldedatum: 3. Dezember 2001 (03.12.2001) (75) *Erfinder/Anmelder (nur für US): FISCHER, Stefan* [DE/DE]; Am Weiher 10, 86807 Buchloe (DE). **VOLKMAR, Ralf-Reiner** [DE/DE]; Triftstrasse 39, 13353 Berlin (DE). **KRAEMER, Hans-Peter** [DE/DE]; Steudacher Strasse 18, 91074 Herzogenaurach (DE).
- (25) Einreichungssprache: Deutsch (74) *Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT*; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch (81) *Bestimmungsstaaten (national): CA, CN, JP, US.*
- (30) Angaben zur Priorität:
100 61 340.3 5. Dezember 2000 (05.12.2000) DE
101 31 967.3 2. Juli 2001 (02.07.2001) DE

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: CURRENT LIMITING DEVICE COMPRISING CURRENT-CARRYING HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR TRACKS

(54) Bezeichnung: STROMBEGRENZUNGSEINRICHTUNG MIT STROMFÜHRENDEN HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITERBAHNEN



(57) Abstract: The invention relates to a current-limiting device comprising current-carrying high-temperature superconductor tracks (HTSL) arranged on a board (PL), which are particularly for use in medium voltage engineering, whereby the high-temperature superconductor tracks (HTSL) form a conductor track structure (LBS) with unbranched conductor tracks. The conductor track structure (LBS) of the high-temperature superconducting tracks (HTSL) is replaced by a line structure (LST), which is branched in series and in parallel, or is replaced by a closed network structure (GNW), whereby the line structure (LST) is realized by multiplying a line element (LE ..) with an identical basic structure, and the network structure (GWN) is realized by basic element recesses (GA).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 02/47180 A2

Beschreibung

Strombegrenzungseinrichtung mit stromführenden Hochtemperatur-Supraleiterbahnen

5

Die Erfindung betrifft eine Strombegrenzungseinrichtung mit auf einer Platte angeordneten stromführenden Hochtemperatur-Supraleiterbahnen, insbesondere für die Mittelspannungstechnik, wobei die Hochtemperatur-Supraleiterbahnen eine Leiterbahnstruktur mit unverzweigten Leiterbahnen bilden.

10

Eine resistive supraleitende Strombegrenzungseinrichtung bildet eine seriell in einen Stromkreis einzufügende supraleitende Schaltstrecke. Dabei wird der Übergang einer supraleitenden Leiterbahnstruktur vom praktisch widerstandslosen kalten Betriebszustand unterhalb der Sprungtemperatur T_c des Supraleitermaterials in den normalleitenden Zustand über T_c (sogenannter Phasenübergang oder „Quench“) ausgenutzt, wobei der nun vorhandene elektrische Widerstand R_n der Leiterbahnstruktur den Strom auf eine akzeptable Höhe $I=U/R_n$ begrenzt. Die Erwärmung über die Sprungtemperatur T_c geschieht dabei durch Joule'sche Wärme in dem Supraleitermaterial selbst, wenn nach Kurzschluss die Stromdichte j über den kritischen Wert j_c des Supraleitermaterials ansteigt, wobei das Material auch unterhalb der Sprungtemperatur T_c bereits einen endlichen elektrischen Widerstand annehmen kann. Im begrenzenden Zustand oberhalb der Sprungtemperatur T_c fließt dann in dem die Strombegrenzungseinrichtung enthaltenden Stromkreis nur ein Reststrom weiter, bis ein zusätzlicher mechanischer Trennschalter den Stromkreis völlig unterbricht.

20

25

30

Mit einer solchen supraleitenden Strombegrenzungseinrichtung vom resistiven Typ kann ein Stromanstieg nach einem Kurzschluss auf einen Wert von wenigen Vielfachen eines Nennstromes begrenzt werden; darüber hinaus ist eine solche Begrenzungseinrichtung kurze Zeit nach dem Anschalten wieder betriebsbereit. Sie wirkt also wie eine schnelle,

35

wünscht hohen Wärmeentwicklungen an den Innenseiten der Radian der supraleitenden Schichten kommen kann. Zu hohe thermische Belastungen können zum Durchbrennen der Leiterbahnen und zu Beschädigungen derselben und deren Tragekörper führen, so dass die Supraleiterstruktur unbrauchbar und der Strombegrenzer nicht mehr funktionsfähig ist. Ursache dafür sind, bedingt durch Inhomogenitäten oder Fehlerstellen innerhalb der Struktur der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen, unerwünscht lokal ablaufende Quenchvorgänge, bei denen an den lokalen hochohmigen Bereichen die gesamte anliegende Spannung abfällt und somit die gesamte über die Leiterbahn geführte elektrische Leistung dort in Wärme umgewandelt wird. Die lokalen Stellen werden somit überhitzt, ggf. aufgeschmolzen und über den dann entstehenden Lichtbogen gänzlich zerstört.

Durch Inhomogenitäten der Schicht der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen wird also der sogenannte Quenchvorgang nicht wie beabsichtigt - gleichzeitig über die gesamte Länge der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen sondern nur lokal im Fehlerbereich der Schicht eingeleitet.

Die Strombegrenzungseinrichtung ist dementsprechend nicht mehr voll funktionsfähig bzw. für den bestimmungsgemäßen Gebrauch nicht mehr einsatzfähig.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht darin, eine Strombegrenzungseinrichtung hinsichtlich ihrer Belastung im Kurzschlussfall so auszulegen, dass Beeinträchtigungen durch Inhomogenitäten der Schichten der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen weitestgehend gemindert sind, und darüber hinaus die Anpassung der Strombegrenzungseinrichtung an die unterschiedlichen Strom- und Spannungsbelastungen der Mittelspannungstechnik in einfacher Weise zu ermöglichen.

Erfindungsgemäß wird dies durch die Merkmale

2.3 die Grundelementausnehmungen sind innerhalb der Netzwerkstruktur derart verteilt angeordnet, dass die Hochtemperatur-Supraleiterbahnen vollflächig parallel und seriell verzweigte Leitungszüge mit annähernd gleich großen Flächen bilden, erreicht.

Mit der Überführung der unverzweigte Leiterbahnstruktur in eine gänzlich geschlossenen Netzwerkstruktur mit den leistungsbedarfsangepaßten Grundelementausnehmungen wird der Grad der Leistungsoptimierung für die Leiterbahnen hinsichtlich ihrer Parallelanordnung und Verteilung auf der gesamten Platte noch zusätzlich gesteigert. Werden die stromführenden Leiterbahnen so gestaltet, dass sich in jedem Knotenpunkt kurze gerade Leiterbahnabschnitte als Verbindungsstege zu den benachbarten Leiterbahnabschnitten und deren Knotenpunkte ergeben, so wird bei einem Quenchvorgang der Temperaturanstieg in einem Leiterbahnabschnitt unmittelbar auch an dessen benachbarte Verbindungsstege übertragen und führt dort ebenfalls zur Temperaturerhöhung. Der Quenchvorgang wird durch diesen Lawineneffekt praktisch vollflächig eingeleitet.

Erfolgt bei der geschlossenen Netzwerkstruktur der Quenchvorgang dagegen nur im Bereich einer lokalen Leiterbahn mit fehlerbehafteter Leiterbahnstruktur, so wird dort nur der anteilige Strom- und Spannungswert in Wärme umgesetzt, die aufgrund der umgebenen freien Flächen gut abgeführt werden kann.

Der Quenchvorgang verläuft über die gesamte Platte gesehen insgesamt weicher, d.h. zeitlich gedehnt und über die Fläche der Platte gesehen annähernd gleichmäßig verteilt.

Darüber hinaus ist mit der praktisch wabenförmigen geschlossenen Netzwerkstruktur bei gleichen äußeren Abmessungen der Platten eine variable Ausgestaltung der Geometrie der Leiterbahnen und damit eine flexible Anpassung an die Leistungsanforderungen für die Strombegrenzungseinrichtungen erreicht.

Gemäß einer Variante haben die Teilstücke quer zur Hauptausdehnungsrichtung der Leiterbahnstruktur eine größere Ausdehnung als in dieser Richtung.

- 5 Ferner ist es möglich, dass in jedem Zweig die Leiterbahn zwei quer zur Hauptausdehnungsrichtung der Leiterbahnstruktur verlaufende Schenkelteile aufweist, die durch einen seitlichen Bogenteil ineinander übergehen, und dass die Leiterbahnbreite in dem Bogenteil mindestens gleich der
10 Leiterbahnbreite in den Schenkelteilen ist und vorzugsweise zwischen dem 1,1fachen und dem 1,2fachen der Leiterbahnbreite in den Schenkelteilen liegt.

Die zuvor beschriebenen Varianten können darüber hinaus im
15 Rahmen der Erfindung beliebig miteinander kombiniert werden.

Die Erfindung wird durch ein figürlich dargestellte Ausführungsbeispiele näher erläutert, wobei

- 20 Figur 1 die unverzweigte Leitungsstruktur der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen der bekannten Strombegrenzungseinrichtung zeigt,
 Figur 2 die verzweigte Linienstruktur einer möglichen Ausführungsform der Erfindung abbildet,
25 Figur 3 die geschlossene Netzwerkstruktur einer weiteren möglichen Ausführungsform der Erfindung erkennen läßt,
 Figuren 4, 5 Kombinationen von unverzweigten Leiterbahnen mit in sich verzweigter Linienstruktur und in sich geschlossener Netzwerkstruktur darstellen.
30 Figur 6 eine Grundform der Leiterbahnstruktur,
 Figur 7 eine spezielle Ausführungsform der Leiterbahn aus einer Leiterbahnstruktur und
35 Figur 8 eine spezielle Weiterbildung aus der Grundform gemäß Figur 6.

grenzungseinrichtung ohne nennenswerte Schwierigkeiten in kurzer Zeit abgeführt werden.

Die geschlossene Netzwerkstruktur GNW kann für die Strombegrenzungseinrichtungen sowohl in Dünnschichttechnik im Zusammenhang mit Substraten als auch in Dickschichttechnik mit und ohne Substrate angewendet werden.

Mit den Figuren 4 und 5 ist angedeutet, dass zur Realisierung der Spannungsbegrenzungseinrichtungen in Verbindung mit flexibler Anpassung an die unterschiedlichen Leistungsanforderungen auch Hochtemperatur-Supraleiterbahnen in Form von Linien mit in sich überwiegend geschlossener Netzwerkstruktur denkbar wären.

Figur 6 verdeutlicht eine Strombegrenzungseinrichtung mit einem Substrat 2 und einer Leiterbahnstruktur aus HTS-Material, deren Grundform in der Figur 6 allgemein mit 3 bezeichnet ist. Diese Struktur 3 weist gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel nur einen einzigen Strompfad S1 zwischen zwei Endstücken 4a und 4b auf, an denen die Struktur zu kontaktieren ist. In der durch eine gepfeilte Linie angedeuteten Hauptausdehnungsrichtung r der Leiterbahnstruktur 3 bzw. des Strompfades S1 soll dieser in mehrere, gleichgestaltete Teilstücke 5j (mit $j=1 \dots n$) unterteilt sein. Jedes dieser Teilstücke 5j umfasst zwei durch gestrichelte Linien veranschaulichten Stromzweige Z1 und Z2. Diese Stromzweige sind in Verbindungsbereichen 6j zwischen jeweils hintereinander angeordneten Teilstücken 5j parallel geschaltet. Die Struktur 3 bildet auf diese Weise zwei zu einer mittleren, zwischen den Endstücken 4a und 4b verlaufenden Verbindungs- oder Mittelachse A spiegelsymmetrische Mäander, die an den Endstücken 4a und 4b sowie in den Verbindungsbereichen 6j miteinander verbunden sind bzw. dort ineinander übergehen. Einer der Mäander ist in der Figur durch eine punktierte Linie M ein Stück weit veranschaulicht.

11

zur effektiven Breite b_{eff} der Leiterbahnstruktur 3 einstellen. Die effektive Länge l_{eff} der Leiterbahnstruktur ist dabei die gesamte Länge des Strompfades entlang eines Mäanders M. Sie bestimmt die maximale Spannung, bei welcher die schaltende Leiterbahnstruktur eingesetzt werden kann. Analog ist die effektive Breite b_{eff} der gesamte dem zu schaltenden Strom zur Verfügung stehende Leiterbahnquerschnitt (also $N_m \times B_m$, wobei N_m die Anzahl der Mäander ist und gemäß Figur 6 gleich 2 ist). Sie bestimmt den kritischen Strom I_c und somit den Nennstrom in der schaltenden Leiterbahnstruktur. Durch Wahl einer Struktur mit einer geeigneten effektiven Länge l_{eff} und/oder effektivem Breite b_{eff} kann eine schaltende Leiterbahnstruktur an eine gewünschte Nennspannung und/oder an einen gewünschten Nennstrom angepasst werden.

Ein Verhältnis $l_{eff}/b_{eff} \approx 5 \times l/b$ ergibt sich, wenn man als Grenzfall einen Mäander annimmt, der keine geraden Leiterbahnteile mehr enthält, also nur noch aus 180° -Bögen besteht. In Figur 7 ist ein solcher Mäander M' als Detailbild einer Leiterbahn L' einer erfindungsgemäß gestalteten Strombegrenzungseinrichtung angedeutet. Wenn man für das Verhältnis von Außen- zu Innenradius der Bögen der Leiterbahn L' die Größe 3 annimmt, kommt man auf das vorgenannte Verhältnis von l_{eff}/b_{eff} . Man kann sich natürlich auch einen Mäander vorstellen, der nicht aus 180° -Bögen, sondern aus Bögen mit kleineren Winkeln zusammengesetzt ist. Bei einer entsprechenden Ausführungsform ergäbe sich dann als Grenzfall eine gerade Leiterbahn und damit $l_{eff}/b_{eff} = l/b$. Bei Einhaltung der vorerwähnten Ungleichung werden gleichzeitig alle vorgenannten Kriterien erfüllt und eine Flächennutzung von deutlich über 50 % erreicht. Vorteilhaft ist es, verhältnismäßig kleine Bahnbreiten B_m von insbesondere etwa 1 mm oder darunter und auch kleine Mäanderradien vorzusehen, da dann eine Aufheizung des Substrates 2 gleichmäßiger erfolgt.

Eine Leiterbahnstruktur einer erfindungsgemäßen Strombegrenzungseinrichtung hat vorteilhaft mehrere,

Patentansprüche

1. Strombegrenzungseinrichtung mit auf einer Platte (PL) angeordneten stromführenden Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL), insbesondere für die Mittelspannungstechnik, wobei die Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL) eine Leiterbahnstruktur (LBS) mit unverzweigten Leiterbahnen bilden, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h die Merkmale
1.1 die Leiterbahnstruktur (LBS) der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL) ist durch eine seriell und parallel verzweigte Linienstruktur (LST) ersetzt,
1.2 die seriell und parallel verzweigte Linienstruktur (LST) ist durch Vervielfachung eines Linienelements (LE ...) mit geometrisch identischer Grundstruktur erreicht.

2. Strombegrenzungseinrichtung mit auf einer Platte (PL) angeordneten stromführenden Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL), insbesondere für die Mittelspannungstechnik, wobei die Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL) eine Leiterbahnstruktur (LBS) mit unverzweigten Leiterbahnen bilden, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h die Merkmale
2.1 die Leiterbahnstruktur (LBS) der Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL) ist durch eine geschlossene Netzwerkstruktur (GNW) ersetzt,
2.2 die Netzwerkstruktur (GNW) ist mit leistungsbedarfsangepassten Grundelementausnehmungen (GA) versehen,
2.3 die Grundelementausnehmungen (GA) sind innerhalb der Netzwerkstruktur (GNW) derart verteilt angeordnet, dass die Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL) vollflächig parallel und seriell verzweigte Leitungszüge mit annähernd gleich großen Flächen bilden.

3. Strombegrenzungseinrichtung mit auf einer Platte (PL) angeordneten stromführenden Hochtemperatur-Supraleiterbahnen (HTSL), nach Patentanspruch 2, g e k e n n z e i c h n e t d u r c h das Merkmal

wobei die Parallelschaltung der Zweige im Verbindungsbereich (6j) zwischen jeweils hintereinander liegenden Teilstücken (5j) erfolgt

5 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass
die Gestalt der Teilstücke (5j) im Wesentlichen
rennbahnförmig oder oval oder bogenförmig ist.

8. Resistive Strombegrenzungseinrichtung

- mit einem Substrat,
- mit einer auf dem Substrat befindlichen
- 10 Leiterbahnstruktur mit metalloxidischem
Hoch- T_c -Supraleitermaterial

sowie

- mit Endstücken zur Kontaktierung der Leiterbahnstruktur,
- wobei die Leiterbahnstruktur (3, 10) mindestens einen
- 15 Hauptstrompfad (S_1 , S_j) aufweist, der in der Hauptausdehnungsrichtung (r) der Leiterbahnstruktur gesehen in mehrere hintereinander liegende, gleichgestaltete Teilstücke (5j) unterteilt ist, welche jeweils zwei parallel geschaltete Zweige (Z_1 , Z_2) bilden, wobei die Parallelschaltung
- 20 der Zweige im Verbindungsbereich (6j) zwischen jeweils hintereinander liegenden Teilstücken (5j) erfolgt.
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass
- die Teilstücke (5j) quer zur Hauptausdehnungsrichtung (r) der Leiterbahnstruktur (3) eine größere Ausdehnung haben
- 25 als in dieser Richtung (r).

9. Resistive Strombegrenzungseinrichtung

- mit einem Substrat,
- mit einer auf dem Substrat befindlichen
- 30 Leiterbahnstruktur mit metalloxidischem
Hoch- T_c -Supraleitermaterial

sowie

- mit Endstücken zur Kontaktierung der Leiterbahnstruktur,
- wobei die Leiterbahnstruktur (3, 10) mindestens einen
- 35 Hauptstrompfad (S_1 , S_j) aufweist, der in der Hauptausdehnungsrichtung (r) der Leiterbahnstruktur gesehen in mehrere hintereinander liegende, gleichgestaltete Teilstücke

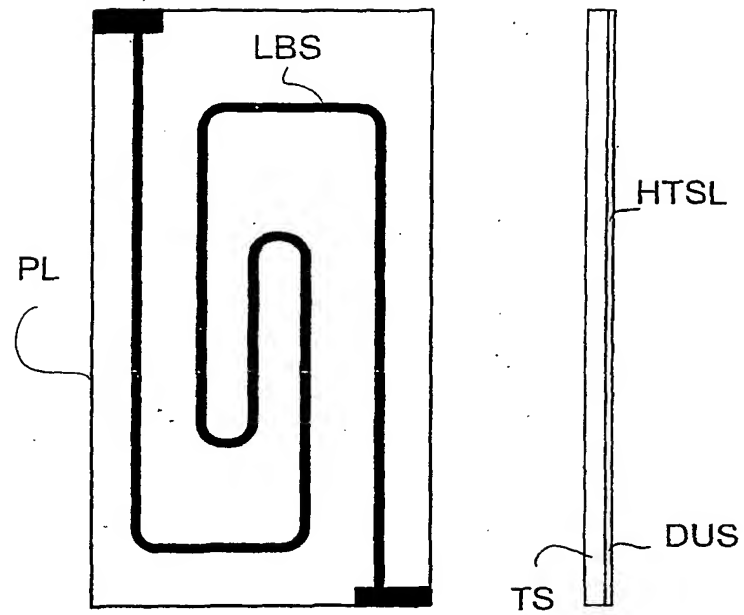


FIG 1

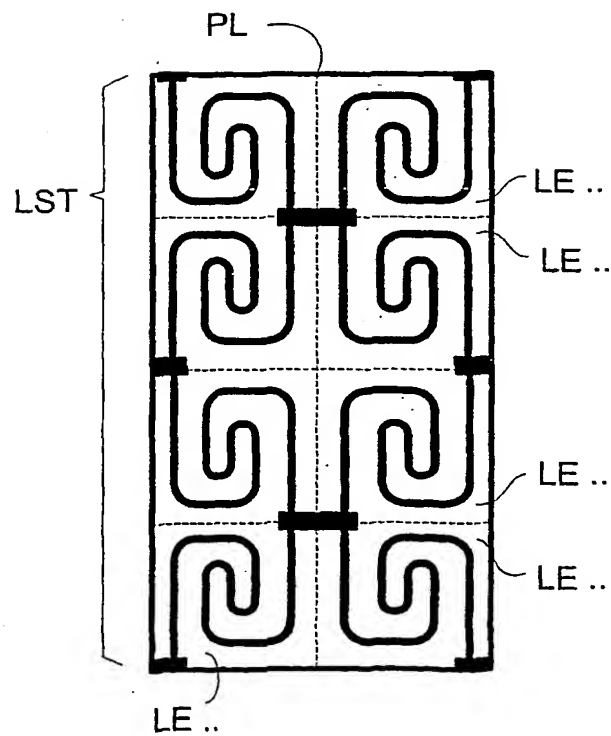
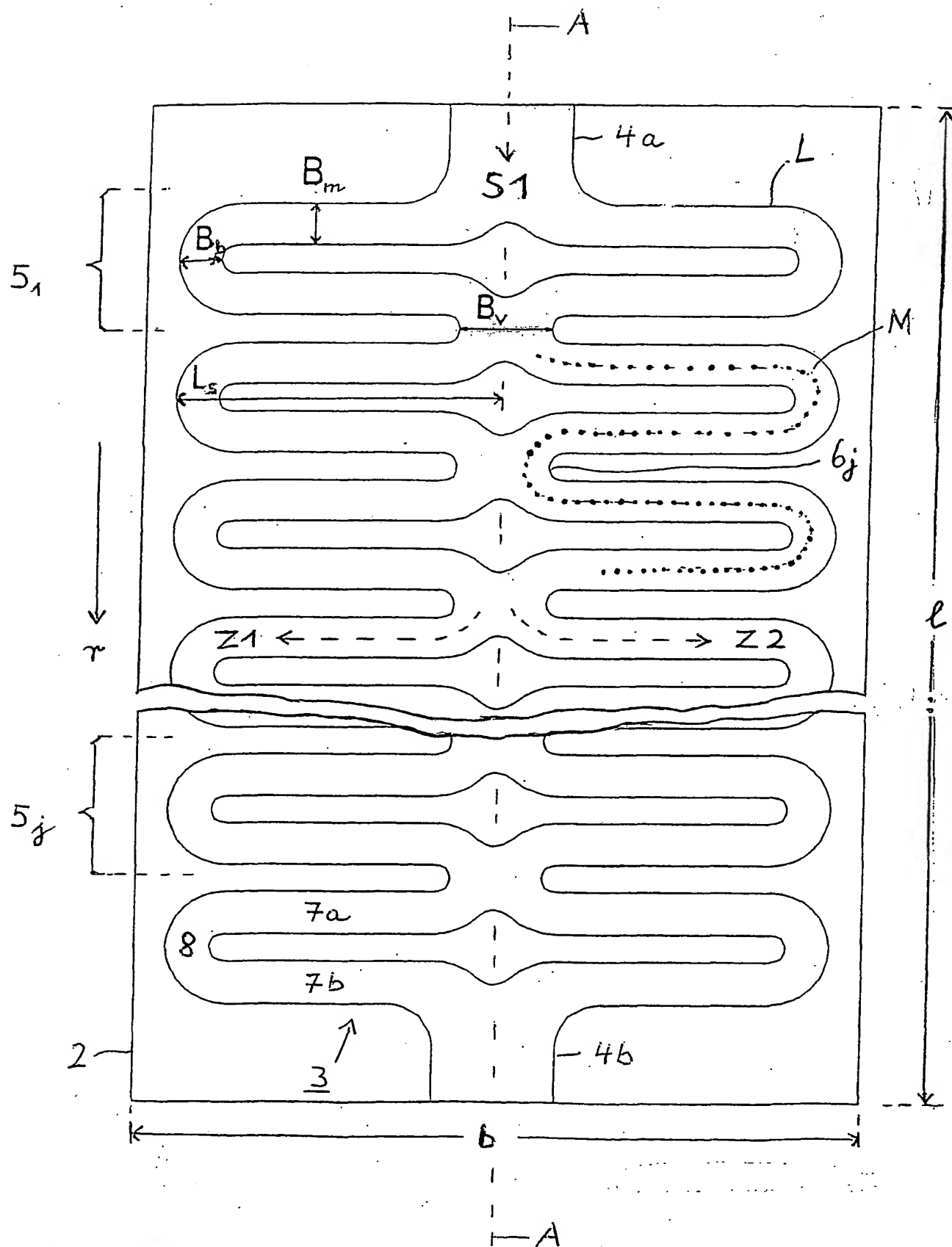


FIG 2



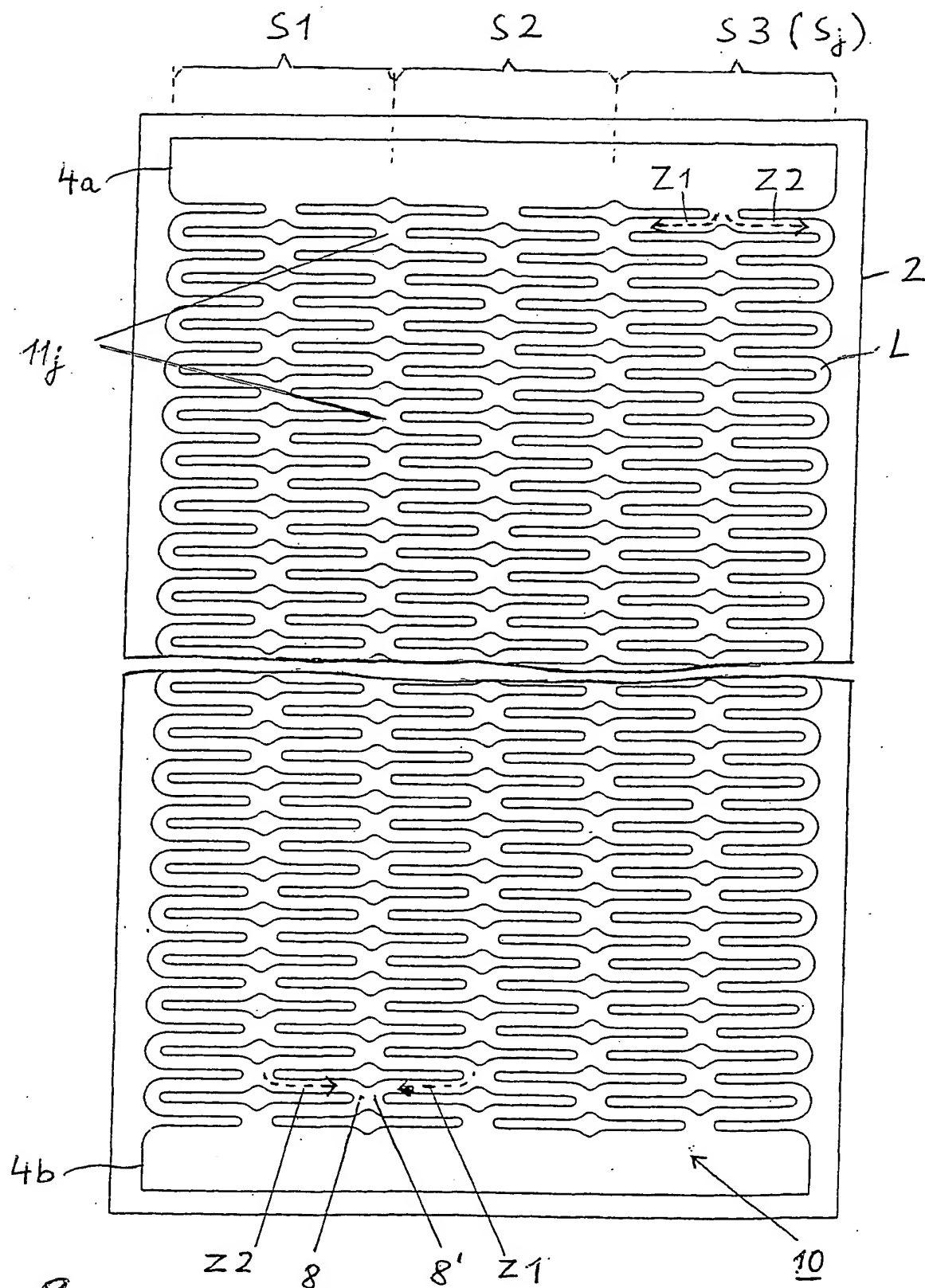


Fig. 8